

Simulatorgestützte Studien zur aktiven Sidesticksteuerung von Luft- und Bodenfahrzeugen am DLR

Mario Müllhäuser, Anna Schieben, Frank Flemisch, Wolfgang von Grünhagen

Zusammenfassung

Das Institut für Flugsystemtechnik und das Institut für Verkehrsführung und Fahrzeugsteuerung des DLR e.V. beschäftigen sich mit der Erforschung von Assistenz- und Automationssystemen, die den Menschen bei der Bedienung von Luft- bzw. Bodenfahrzeugen unterstützen. Im vorliegenden Beitrag werden die Gemeinsamkeiten beider Institute bei der Entwicklung von Strategien zur Mensch-Maschine-Interaktion (MMI) in Helikoptern und Kraftfahrzeugen herausgearbeitet. Dabei wird vor allem die Bedeutung der Simulation als Werkzeug bei der Systementwicklung und der Erhebung von MMI-spezifischen Daten hervorgehoben sowie die Integration des aktiven Sidesticks als intuitive Nutzerschnittstelle dokumentiert. Um die Vorgehensweise beider Institute zu verdeutlichen, werden im zweiten Teil des Beitrags ausgewählte Forschungsergebnisse sowohl aus dem Bereich der Helikopter-Forschung des Instituts für Flugsystemtechnik als auch der Fahrzeugforschung des Instituts für Verkehrsführung und Fahrzeugsteuerung vorgestellt.

1 Einleitung

Das DLR beschäftigt sich als Großforschungseinrichtung sowohl mit den namensgebenden Domänen der Luft- und Raumfahrt als auch mit den Bereichen Energie und Verkehr. Im vorliegenden Beitrag sollen exemplarisch Arbeiten des Instituts für Flugsystemtechnik (FT) sowie des Instituts für Verkehrsführung und Fahrzeugsteuerung (FS) des DLR vorgestellt werden. Die Abteilung Hubschrauber des Instituts FT erforscht unter anderem Systeme zur Pilotenunterstützung. Das Institut FS beschäftigt sich neben anderen Gebieten mit der Entwicklung und Gestaltung von Fahrerassistenzsystemen, die den Fahrer in der Fahrzeugführung unterstützen. Beide Institute arbeiten zwar in unterschiedlichen Domänen, jedoch mit ähnlichen Werkzeugen und Technologien und mit einem ähnlichen Vorgehen.

Die Forschungszweige zu Luft- bzw. Bodenfahrzeugen haben traditionell eigene Kulturen und Techniken entwickelt, besitzen aber einen großen Überschneidungsbereich, der mit der fortschreitenden Technologieentwicklung immer deutlicher wird. Diese Überschneidung findet sich zum Beispiel in der Simulati-

onstechnik, die in der Luftfahrt breite Anwendung gefunden hat und auch im Kraftfahrzeugbereich zum Einsatz kommt. Weiterhin ist in beiden Domänen die Tendenz zu beobachten, Assistenzsysteme zu nutzen, die den Fahrer oder Hubschrauberpiloten in seiner Tätigkeit hinsichtlich Sicherheit, Leistung und Komfort unterstützen. Solche Assistenzsysteme sind in ähnlicher Form bereits seit längerem in Flugzeugcockpits im Einsatz. Dort ist man auch eine hohe Automatisierung gewohnt, die mit zunehmend leistungsfähiger Technik auch im Hubschrauber und zudem durch die Verminderung der Stückkosten auch im Kraftfahrzeug Anwendung findet.

Mit steigender Assistenz und Automatisierung geht die Frage einher, wie der Informationsfluss zwischen Mensch und Maschine zukünftig gestaltet werden kann, um einen sicheren und einfach bedienbaren Betrieb zu gewährleisten. Von Vorteil kann hier der Einsatz aktiver Steuerorgane sein. Aktive Steuerorgane nutzen den haptischen Wahrnehmungskanal des Menschen und können Rückmeldung über den Systemzustand geben oder Handlungsvorschläge machen. Sie bieten damit die Möglichkeit, sowohl das Verständnis und Situationsbewusstsein des Menschen zum Zustand und zu Aktionen der Automation als auch die Performanz des Gesamtsystems zu erhöhen (z.B. Whalley et al., 2000; Griffith & Gillespie, 2005).

Sowohl das Institut FT als auch das Institut FS beschäftigen sich mit der Erforschung aktiver Sidesticks zur Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle von neuartigen Assistenzsystemen. Im vorliegenden Beitrag soll daher aufgezeigt werden, welche Simulationen und Versuchsträger in beiden Instituten zum Einsatz kommen, um die Nutzung von aktiven Sidesticks zu gestalten und zu evaluieren (Bild 1). Im ersten Teil des Beitrages wird zunächst auf Simulatoren und aktive Sidesticks eingegangen, um im zweiten Teil des Beitrags anhand zweier Forschungsberichte einen konkreten Einblick in die Arbeit beider Institute zu geben.



Bild 1: Simulatorgestützte Sidestickintegration der Institute FS und FT

2 Darstellung unterschiedlicher Simulationswerkzeuge beider Institute

Sowohl das Institut FT als auch das Institut FS nutzen für ihre Forschungen verschiedene Simulationen und Versuchsträger, die unterschiedliche Realitätsgrade umfassen. Die Begriffe „Realität“ und „Simulation“ sind dabei nicht als Gegensätze, sondern als Spektrum zwischen 100 % Simulation und 100 % Realität zu begreifen, auf dem vielfältige Kombinationen möglich sind (Bild 2).

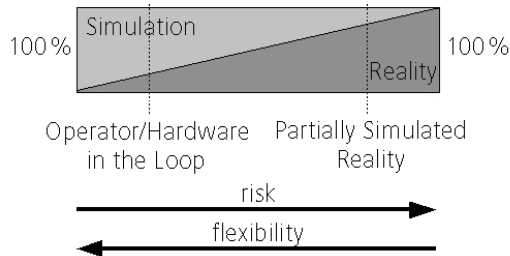


Bild 2: Simulationsspektrum (vgl. auch Bernotat, 1978; Milgram et al., 1998)

Das Simulationsspektrum in Bild 2 verdeutlicht, dass die Anthropotechnik verschiedene Untersuchungswerkzeuge nutzen kann, um Mensch-Maschine-Schnittstellen zu gestalten und zu evaluieren. Die verschiedenen Realitätsgrade der Werkzeuge ermöglichen dabei unterschiedlich flexible Gestaltungs- und Testbedingungen: Simulierte Systeme lassen sich durch Parameteränderungen schnell verändern und sind damit flexibel. Sie decken aber immer nur den Teil der Realität ab, für den sie ausgelegt sind. Die erreichte Simulationsgüte ist dabei vom betriebenen Aufwand abhängig. Bei realen Systemen geht die Flexibilität zurück und das Risiko von unvorhergesehenen und sicherheitskritischen Ereignissen steigt. Simulationen, die sowohl das System als auch den Menschen simulieren, sind demnach dem linken Rand des Spektrums einzuordnen. Diese Simulationen gelten als flexibel und schnell einsetzbar, sind jedoch häufig, was die Simulation des Menschen betrifft, stark vereinfachend. Es bietet sich daher an, die Simulation so auszulegen, dass Aufwand und Risiko in einem vertretbaren Verhältnis zueinander stehen. Bei *Hardware-in-the-Loop*-Simulationen wird die Umgebung des zu überprüfenden Systems simuliert, wodurch die Hardware selbst unter festgelegten Bedingungen getestet werden kann. In *Human-* oder *Operator-in-the-Loop*-Simulationen ist der Mensch entweder selbst Forschungsgegenstand oder ein realer Teil der Versuchsumgebung. Mit *Partially Simulated Reality* bezeichnen wir Versuchsträger, die sich in der realen Umwelt bewegen, aber durch besondere Sicherheitssysteme das Risiko beim Testen neuer (Teil-)Systeme reduzieren. Hier können zum Beispiel im Fahrzeugbereich auf Teststrecken unterschiedliche Verkehrssituationen künstlich erzeugt werden. Dies bietet die Möglichkeit, Studien unter annähernd realen Bedingungen durchzuführen, die zudem einer gewissen experimentellen Kontrolle unterliegen. Fahrzeuge oder Helikopter ohne besondere Sicherheitsmechanismen rücken an den rechten Rand

des Spektrums. Hier ist eine Erhebung von realen Nutzungsdaten möglich, die allerdings keiner experimentellen Kontrolle mehr unterliegt.

Ab einer Mindestsimulationsgüte ist für die Leistungsfähigkeit von Simulatoren und Versuchsträgern weniger die Realitätsnähe als vielmehr die Durchlässigkeit (Permeabilität) der Werkzeugkette und die Migrationsfähigkeit der Prototypen durch das Simulationsspektrum hindurch entscheidend. Erst eine hohe Durchgängigkeit ermöglicht es, Konzepte aus der Simulation effizient in die Realität zu ziehen, ohne durch größere Brüche, z.B. durch Werkzeugwechsel, behindert zu werden.

Im Folgenden werden die Simulationswerkzeuge der Institute FT und FS vorgestellt, die unterschiedliche Realitätsgrade abdecken, um zu verdeutlichen, wie diese Werkzeugkette für die Erforschung und Entwicklung von Mensch-Maschine-Schnittstellen eingesetzt wird.

2.1 Vorstellung der Simulations- und Versuchswerkzeuge des Instituts FT

Die verwendeten Simulationen lassen sich in drei Hauptbereiche einteilen (Bild 3).

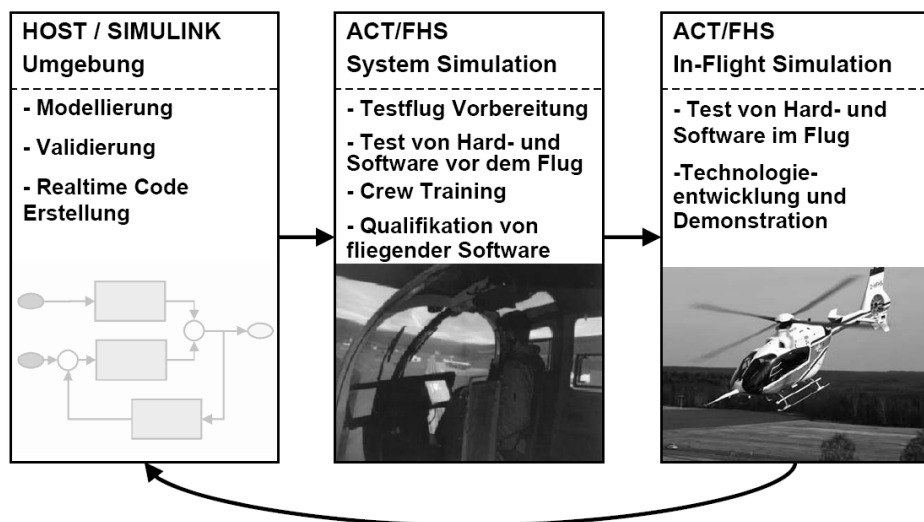


Bild 3: Werkzeugkette: HOST/Simulink-Modell, Bodensimulator und FHS

Analog zum Simulationsspektrum (Bild 2) ist ganz links die Computersimulation einzuordnen. Hier beginnt die Entwicklung der Systeme unter Zuhilfenahme computerbasierter Simulationswerkzeuge, z.B. Matlab-Simulink und der speziell für Hubschrauber entworfenen Umgebung HOST (*Helicopter Overall Simulation Tool*; erstellt von Eurocopter, Onera und dem Institut FT, siehe Benoit et al., 2000). HOST greift auf ein sehr präzises mathematisches Modell der Hubschrauberflugmechanik zurück. Damit wird eine gezielte, reproduzierbare

Analyse des Flugverhaltens und der Einflussparameter möglich. Dies bildet die Grundlage zur mathematisch-physikalischen Auslegung von Algorithmen von Pilotenassistenzsystemen.

Zur Einbindung des Piloten in die Simulation steht der „Fliegende Helikopter-Simulator“ (FHS) und seine System- bzw. Bodensimulation zur Verfügung. Der FHS wurde als Gemeinschaftsprojekt von DLR und Eurocopter auf Basis einer EC 135 entwickelt und 2002 in Dienst gestellt. Die Steuerung wurde so modifiziert, dass sie, bis auf ein mechanisches Ersatzsystem, komplett elektromechanisch erfolgt. Die Signale werden vom Potentiometer am Pilotensteuer über Lichtwellenleiter an die Aktuatorik übertragen (*fly-by-light*). Dadurch lässt sich experimentelle Hard- und Software einbinden, z.B. neue Regelungsalgorithmen oder aktive Sidesticks. Dies gilt aber nur für den rechten, den Experimentalpilotsitz. Auf dem linken Sitz nimmt ein Sicherheitspilot Platz, der den Flug permanent überwacht. Seine Steuer sind über die mechanische Anlenkung mit den Stellgliedern an den Steuerflächen verbunden. So kann er monitoren, was die Aktuatoren an den Steuerflächen tatsächlich einsteuern. Dadurch kann er etwaige Fehler erkennen und die Steuerung rechtzeitig übernehmen, um den Hubschrauber in eine sichere Fluglage zu überführen. Erst wenn der Sicherheitspilot die Freigabe erteilt, hat das Experimentalsystem samt Experimentalpilot wieder Zugriff auf die Steuerung. Der FHS ist dem rechten Randbereich des Spektrums (Bild 2) zu zuordnen.

Zwischen computerbasierter Simulation und FHS steht der Bodensimulator. Dieser simuliert den FHS mit einem echten Cockpit und einem Sichtsystem mit großem Sichtbereich. Das Besondere an der Bodensimulation ist die hohe Simulationstiefe: Zum einen wird das Flugverhalten durch ein genaues mathematisches Modell der EC 135 simuliert. Zum anderen wird auch das Kernsystem mit den Sicherheitsfunktionen des FHS simuliert. Damit wird eine sehr hohe Durchgängigkeit zwischen dem Bodensimulator und dem (fliegenden) FHS erreicht: Nicht nur die Steuer, auch die Anzeigen und sogar die Steckverbindungen sowie Softwareschnittstellen zum Anschluss von externen Geräten sind identisch. So lassen sich Systeme, die in der Bodensimulation erfolgreich getestet wurden, unproblematisch in den FHS integrieren (vgl. Kaletka, 2003). Zusätzlich wird die Zusammenarbeit von Experimentalpilot, Flugversuchingenieur und Sicherheitspilot im Simulator zur Flugvorbereitung trainiert.

2.2 Vorstellung der Simulations- und Versuchswerkzeuge des Instituts FS

Im Institut FS stehen verschiedene Simulations- und Versuchswerkzeuge zur Verfügung, die ähnlich wie die bereits beschriebenen Systeme des Instituts FT unterschiedliche Realitätsgrade abdecken. Im Folgenden werden drei der Systeme vorgestellt, die für die in Kapitel 5 erläuterten Forschungsarbeiten von Bedeutung sind. Dies sind der Festsitzsimulator SMPLSim, der „Dynamische Fahrsimulator“ sowie das Forschungsfahrzeug FASCar (Bild 4).

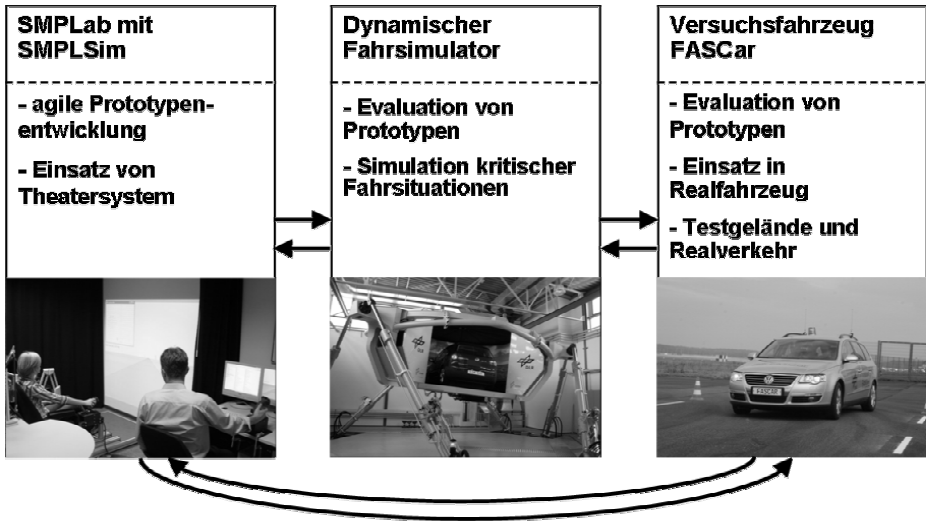


Bild 4: Werkzeugkette SMPLab, Dynamischer Fahrsimulator und FASCar

Das Institut FS nutzt einen generische Festsitzsimulator SMPLSim, welcher es ermöglicht, Ideen zur Prototypgestaltung direkt umzusetzen. Der SMPLSim besteht aus einem einfachen Fahrersitz, einer Beamer-Projektionsfläche sowie einem Simulationsrechner. Charakteristisch für den SMPLSim ist die agile Prototypenentwicklung (Schindler & Flemisch, 2007) z.B. mit einem integrierten Theatersystem, einer Weiterentwicklung der *Wizard-of-Oz*-Technik (für eine detaillierte Beschreibung des Vorgehens siehe Schomerus et al., 2006). Kern des Theatersystems sind zwei elektronisch gekoppelte, aktive Sidesticks der Firma Stirling Dynamics, die es erlauben, a) das Interaktionsdesign im Dialog des Designteams explorativ zu entwickeln und b) das Design frühzeitig mit potentiellen Nutzern zu testen, indem die Interaktion zunächst von einem Mitglied des Designteams (*confederate*) über einen der Sticks eingespielt wird. Im Kontext des in Bild 2 dargestellten Spektrums der Simulation ist die Theatersystemtechnik einem recht hohen Simulationsgrad zuzuordnen. Dabei wird hier, anderes als in mathematischen Simulationen, nicht der Mensch, sondern die Assistenzfunktion durch den Menschen simuliert bzw. emuliert, bevor diese in Software implementiert wird.

Für die Erprobung von Assistenzfunktionen in einem fortgeschrittenen Stadium des Prototyps kommt der „Dynamische Fahrsimulator“ des Instituts FS zum Einsatz (Stöbe, 2006). Die realitätsnahe Gestaltung der Simulation ermöglicht eine valide Beurteilung der Funktionen auch in kritischen Situationen und damit einen sicheren Übergang in das Versuchsfahrzeug und später in den realen Verkehr. Betrachtet man das Simulationsspektrum in Bild 2, so lässt sich der Dynamische Fahrsimulator als *Operator-in-the-loop*-System einordnen, in welchem durch den Einsatz eines Bewegungssystems, einer komplexen Visuali-

sierung sowie die Integration eines kompletten Fahrzeugs ein realitätsnahes Fahrgefühl vermittelt wird.

Um den Prototyp in einem Realfahrzeug weiterzuentwickeln und zu testen, steht am Institut FS das FASCar zur Verfügung. Das FASCar ist ein universell einsetzbares Versuchsfahrzeug, mit dem beliebige Eingriffe in die Fahrzeugdynamik bis hin zum semiautonen und autonomen Fahren möglich sind. Das Fahrzeug verfügt über verschiedene Zusatzeinbauten. Dies sind ein aktiver Bremskraftverstärker zum Kommandieren eines Bremsdrucks von bis zu 150 bar sowie ein Steuergerät zur Emulation des konventionellen Gaspedals, um beliebige Beschleunigungswerte realisieren zu können. Weiterhin sind im Fahrzeug ein aktives Gaspedal für haptische Signale am Fahrerfuß sowie ein Lenkstangenmotor, der zusätzlich zum Fahrer in die Lenkvorgänge eingreifen kann, verbaut. Für die Implementierung von Fahrerassistenzsystemen verfügt das Fahrzeug über Sensoren zur Umgebungswahrnehmung, wie ein Radar und ein optisches Spurfindungssystem. Zusätzlich enthält das Fahrzeug eine Rechnerausstattung, die sowohl für Entwicklung und Test prototypischer Assistenzsysteme als auch zur Aufzeichnung und Visualisierung von Messdaten genutzt wird. Das FASCar bietet die höchste Realitätsnähe zum Realverkehr. Es kann mit geringen Eingriffen der Assistenz in die Fahrzeugdynamik im Realverkehr eingesetzt werden; stärkere Eingriffe sind auf Testgeländen möglich, auf welchen Verkehrssituationen simuliert werden können.

Im Sinne der Durchlässigkeit der in Bild 4 dargestellten Werkzeugkette können die im SMPLSim entwickelten Prototypen sowohl im Dynamischen Fahrsimulator als auch im FASCar zügig eingebaut und dort in unterschiedlichen Verkehrssituationen evaluiert werden. Mögliche Verbesserungen des Designs, die aus den Ergebnissen der Evaluationen resultieren, können dann erneut im SMPLSim durchgeführt werden.

3 Der Einsatz aktiver Steuerorgane in Assistenzsystemen

Die in Kapitel 2 genannten Simulatoren und Versuchsträger werden in beiden Instituten genutzt, um neuartige Assistenzfunktionen zu entwickeln und zu überprüfen. Sowohl in Hubschraubern als auch in Fahrzeugen ist es mit moderner Technik möglich, den Systemzustand zu überwachen, System- und Umweltinformationen zu erfassen und daraus Handlungsvorschläge zu generieren. Diese Informationen können dem Piloten oder Fahrer als Systembediener zur Verfügung gestellt werden, um das Gesamtsystem sicherer und leistungsfähiger zu machen. Eine Möglichkeit, diese Informationen zu übermitteln, liegt im Einsatz aktiver Steuerorgane, z.B. aktiver Sidesticks.

Aktive Steuerorgane zeichnen sich durch die Eigenschaft aus, selbst Kräfte generieren zu können. Dazu enthalten sie aktive Elemente, z.B. Elektromotoren. Die damit erzeugten Kräfte spürt der Pilot/Fahrer am Steuer. Durch eine gezielte Ansteuerung des aktiven Steuerorgans kann man dem Piloten oder Fahrer somit

Informationen auf dem haptischen Wahrnehmungskanal übermitteln. Der haptische Kanal hat sich als besonders günstig erwiesen, um Informationen an den Menschen zu übermitteln (Whalley et al., 2000; Griffith & Gillespie, 2005). Dies gilt insbesondere deshalb, weil ein Pilot oder Fahrer durch Informations- und Warnanzeigen sowie das Prüfen der Außensicht bereits stark visuell und teilweise auch akustisch beansprucht ist.

Aktive Steuerorgane bieten zudem die Möglichkeit, Signale unterschiedlicher Art übermitteln zu können. Beispielsweise können über kontinuierliche Kraft-Weg-Verläufe Steuerempfehlungen gegeben werden, durch kurze Kraftimpulse kann der Systembediener auf besondere Ereignisse hingewiesen werden oder durch eine Vibration vor einer Systemgrenze oder einer Gefahr aus der Umwelt gewarnt werden. Zudem steht mit diesen Steuerorganen ein Werkzeug zur Verfügung, welches ein intuitives Aushandeln der Strategie zwischen Pilot/Fahrer und Assistenzsystem ermöglicht. Je nach Systemauslegung kann der Bediener z.B. den Handlungsvorschlägen der Assistenz zustimmen oder diese durch eigene Steuereingaben am Sidestick verändern oder übersteuern.

Aktive Sidesticks werden sowohl am Institut FT als auch am Institut FS eingesetzt, um zu erforschen, wie Informationen von Assistenzsystemen an den Systembediener zu übermitteln sind. Forschungsziel ist es, die (zukünftig) zur Verfügung stehenden Messdaten so zu nutzen, dass daraus haptisch vermittelbare und für die Piloten oder Fahrer intuitiv verständliche Informationen werden.

Um einen Einblick in die aktuellen Forschungen der beiden Institute zu gegeben, werden im folgenden Teil des Beitrags zwei Studien der Institute vorgestellt. Während sich die Studie des Instituts FT mit der generellen Fragestellung eines Sidesticks als Ersatz für den klassischen Kollektivhebel beschäftigt (Kapitel 4), wird in Kapitel 5 das Vorgehen bei der Entwicklung und Evaluation einer integrierten Längs- und Querverführung für aktive Steuerorgane in unterschiedlichen Simulatoren und Versuchsträgern am Institut FS vorgestellt.

4 Akzeptanzstudie zur Sidestickkonfiguration am Institut FT

Wie ein Hubschrauber gesteuert wird, lässt sich allgemein verständlich und ohne viel Theorie beschreiben, so wie hier in einem Radiobeitrag des Deutschlandfunks: *„Zur Steuerung des Hubschraubers benötigt der Pilot beide Hände und Füße. Mit der linken Hand kontrolliert er über einen Hebel neben dem Sitz den Auftrieb des Hauptrotors. Mit der rechten Hand verstellt der Pilot über den Steuerknüppel die Neigung des Hubschraubers nach links, rechts, vorn oder hinten. Am Boden finden sich zwei Fußpedale, mit denen der Heckrotor und damit die Rechts-Links-Drehung gesteuert wird...“* (Krauter, 2007). Die Fachtermini für die Steuerorgane heißen Kollektivhebel oder auch Kollektivpitch für die Auftriebssteuerung und zyklisches Steuer für die Steuerung der Neigung.

Wie bereits einleitend erwähnt, wird in der Abteilung Hubschrauber des Instituts FT an der Integration von aktiven Steuerorganen in das Hubschraubercockpit

geforscht. Geht man von der klassischen Hubschraubersteuerung aus, bei der der Pilot beide Hände und beide Füße benötigt, um alle vier Steuerachsen zu bedienen, so bietet es sich an, für alle Gliedmaßen ein aktives Steuer zur Verfügung zu stellen. Begonnen wurde am Institut mit der Integration eines aktiven Sidesticks für die rechte Hand. Dieser wird aktuell schon in der Bodensimulation und fliegend im FHS eingesetzt und erforscht. Der aktive Sidestick für die linke Hand ist die konsequente Fortsetzung der Cockpit-Umgestaltung. Durch den Sidestick linker Hand steht dem Piloten auch für die Steuerung in der Hubachse ein aktives Steuer mit haptischem Feedback zur Verfügung. Die Idee eines aktiven Kollektivs ist überdies nicht neu: Man kann das konventionelle Kollektiv zu einem aktiven Steuer umrüsten, indem man das vorhandene konventionelle Steuer um einen Aktuator erweitert, wie geschehen bei Augustin et al. (2002). Aufgrund der großen Hebelarmlänge dieses Steuers ergeben sich aber regelungstechnische Schwierigkeiten, welche die Qualität der haptischen Signale negativ beeinflussen – das System ist träge. Diese kann man umgehen, indem man den konventionellen, langen Hebelarm durch einen kurzen Sidestick ersetzt. Das Hubschraubercockpit erinnert dann an einen Bagger-Führungsstand (Bild 5).

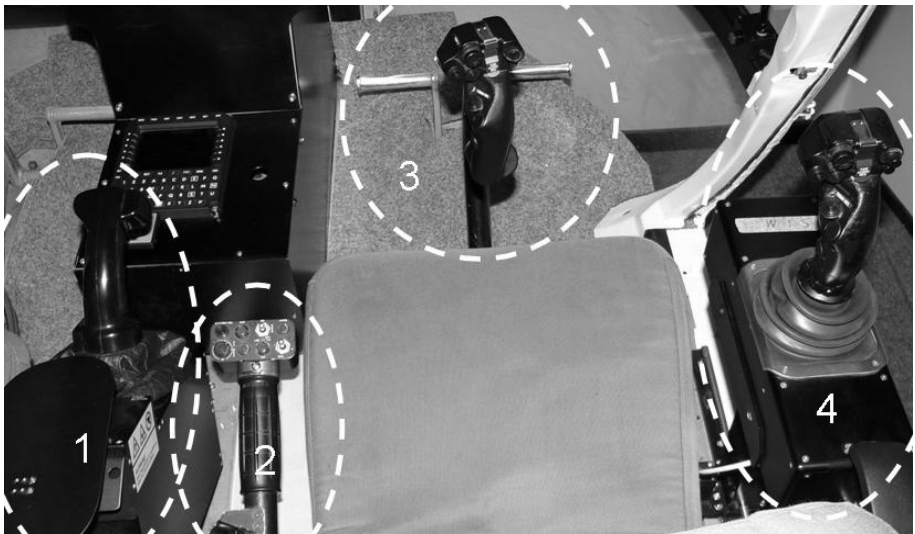


Bild 5: Variables Cockpit FHS-Bodensimulation - linker Sidestick (1), Kollektivhebel (2), Centerstick und Pedale (3), rechter Sidestick (4)

Diese Konfigurationsänderung stellt damit eine deutliche Veränderung gegenüber dem bisher gekannten Cockpit dar: Der Pilot hat nun links nicht mehr einen langen Hebel mit einem großen Steuerweg, sondern einen kurzen Steuerknüppel zur Verfügung. Damit verändern sich die Sitzhaltung des Piloten und auch der Bewegungsablauf von einer vertikalen hin zu einer horizontalen Steuerbewegung. Diese Veränderungen wirken sich möglicherweise negativ auf die Steuerbarkeit

des Hubschraubers aus: In einer Untersuchung von Whalley et al. (2000) wurden primär verschiedene Hinweissysteme zur Betriebsgrenzeinhaltung experimentell miteinander verglichen. Unter anderem wurde dabei aber auch untersucht, wie sich die Flugeigenschaften bei der Steuerung mit Sidesticks und mit konventionellen Steuern voneinander unterscheiden. Es zeigte sich, dass die erbrachten Leistungen und die von den Piloten bewerteten Flugeigenschaften in Flügen mit konventioneller Steuerung besser waren als in Flügen mit Sidesticks. Dies wurde auf den kleineren Bewegungsbereich der Sidesticks zurückgeführt und auf die Gewöhnung der Piloten an die konventionellen Steuer. In der vorliegenden Studie sollte die Umgestaltung des Cockpits pragmatisch untersucht werden, um über die Beschaffung entsprechender Sidesticks zur Integration in die Simulatoren zu entscheiden. Während es in der oben genannten Untersuchung um die Bewertung der Flugeigenschaften ging, sollte hier in einer Gebrauchstauglichkeitsstudie (engl. *usability assessment*) überprüft werden, wie die subjektiven Pilotenkommentare zu einer Steuerung der Kollektivfunktionen mit einem Sidestick ausfallen.

4.1 Methode

Es wurde ein Versuchskonzept ausgearbeitet, bei dem fünf Versuchspiloten in einem Versuchsaufbau die Cockpitkonfiguration mit einem Sidestick für die linke Hand testen konnten. Sie wurden dabei systematisch interviewt.

Der Versuchsaufbau wurde in der Bodensimulation des FHS realisiert. Dazu wurde das Hubschraubercockpit um einen Sidestick für die rechte Hand (Stirling Dynamics, Goldstick) und einen Sidestick für die linke Hand (DLR/TU Braunschweig, MAGSI) erweitert (Bild 5). Es muss hier erwähnt werden, dass der zu dieser Studie für die linke Hand ausgewählte MAGSI sich nicht für den operationellen Einsatz als Kollektiv eignet, da er keine „Breakout“-Eigenschaften besitzt. Das bedeutet, dass er immer in seine Mittelstellung zurückkehrt. Im Versuch mussten die Piloten den Stick daher, anders als gewohnt, permanent in der Hand halten. Weil die konventionellen Steuerorgane in einigen Teilen des Versuchs benötigt wurden, blieben diese während des gesamten Versuchs eingebaut. Über die Versuchssoftware lässt sich einstellen, welche Steuer in Gebrauch sind. Um die Veränderung zum konventionellen Steuer nicht zu groß zu machen, wurde der Sidestick mit einem Neigungswinkel von ca. 30° nach vorn eingebaut.

4.2 Versuchspersonen

Als Versuchspiloten wurden fünf erfahrene Berufspiloten ausgewählt. Sie erschienen eher in der Lage als Flugschüler, sich auf die neuen Steuer konzentrieren zu können, da sie über ausreichend Flugerfahrung verfügen. Bei den Teilnehmern handelte es sich ausschließlich um Experten (Militärpiloten mit einer Erfahrung aus 2.800 bis 7.500 Flugstunden).

4.3 Teilversuche

Um die Piloten an das Setup im Simulator zu gewöhnen, wurde zunächst ein Durchlauf zur Einführung des rechten Sidesticks durchgeführt. Danach folgte der eigentliche Versuch mit dem linken Sidestick als Kollektiv in Verbindung mit einem Sidestick für die rechte Hand. Der Versuch wurde mit einer Konfiguration zur zusätzlichen Steuerung der Gierachse mit der verbleibenden Querachse des linken Sidesticks abgeschlossen. Sowohl der erstgenannte Vorbereitungsversuch als auch der letztgenannte Versuch werden hier nicht weiter behandelt.

4.4 Flugaufgabe

Je nach Flugmanöver bewegt der Pilot die Steuer unterschiedlich stark und häufig. Um eine sinnvolle Aussage über die Gebrauchstauglichkeit eines Steuers zu bekommen, ist es daher wichtig, dass unterschiedliche Manöver geflogen werden. Es wurde eine Aufgabe ausgearbeitet, die zum einen unterschiedliche Flugzustände kombiniert und zum anderen dem normalen Piloten, ohne Testpilotenausbildung, bekannt ist: eine einfache Platzrunde (engl. *pattern*). Diese musste unter Einhaltung von Vorgaben, d.h. abschnittsweise wechselnden Höhen und Geschwindigkeiten, geflogen werden. Wegen der besonderen Schwierigkeiten der Umwelteinschätzung im Simulator wurde auf Start und Landung verzichtet: Das Simulationsszenario beginnt in einem gestarteten Hubschrauber und es endet in einem Schwebeflug (engl. *hover*). Die Platzrunde dauert ca. 3 Minuten. Die tatsächliche Einhaltung der geforderten Präzision wurde nicht bewertet. Allenfalls wurden die Piloten während der ersten Platzrunden auf Abweichungen hingewiesen, bis sie das Pattern verinnerlicht hatten.

4.5 Interview

Die Befragung der Piloten fand an mehreren Stellen des Versuchs statt. In jedem der Teilversuche wurden die Piloten zunächst zu den Eindrücken der ersten Platzrunde interviewt (*unskilled*). An eine freie Trainingsphase von ca. 10 Minuten Dauer schloss sich eine weitere Platzrunde an, nach der sie ein zweites Mal befragt wurden (*skilled*). Die halbstrukturierten Teilinterviews enthielten geschlossene und offene Fragen. In einem freien Teil war es auch möglich, spontan auftretende Fragen an den Versuchspiloten zu richten. Darüber hinaus wurde die Methode des lauten Denkens angewandt. Das ermöglichte es, die Ideen und Eindrücke der Piloten schon während des Fluges zu erfahren. Das Interview und der Ablauf wurden vorher in einem Drehbuch notiert. Die Antworten wurden darin vom Versuchsleiter protokolliert. Zusätzlich wurde der Versuch mittels Videoaufnahmen dokumentiert.

4.6 Ergebnisse

Der oben beschriebene Gesamtversuch dauerte für jeden Piloten ca. 2 Stunden bzw. wurde in zwei Fällen nach dieser Zeit unvollständig abgebrochen. Der hier beschriebene Teilversuch hat im Mittel 34 Minuten eingenommen. Auszugsweise werden hier die wichtigsten Ergebnisse wiedergegeben.

Nach Beobachtung der Versuchsleitung konnten alle Piloten die gestellte Flugaufgabe mit der gegebenen Kollektiv-Sidestick-Konfiguration steuern. Die Auswertung der halbstrukturierten Interviews zeigt, dass vier von fünf Piloten sich vorstellen können, einen realen Hubschrauber in dieser Steueranordnung zu fliegen (Tabelle 1).

Tab. 1: Auszug der Ergebnisse aus der Akzeptanzstudie (angeben sind die Anzahl der Personen in der jeweiligen Antwortkategorie)

Item	ja	1	2	3	4	5	6	nein
		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Könnten Sie sich vorstellen, diese Steuerkombination in einem normalen Hubschrauber zu fliegen?	3	1					1	

Sie gaben außerdem an, dass geringer bis mittlerer zusätzlicher Trainings- bzw. Ausbildungsbedarf nötig sei. Die Arbeitsbelastung wurde als eher gering und in einem Fall als hoch angegeben (Tabelle 2).

Tab. 2: Auszug der Ergebnisse aus der Akzeptanzstudie (angeben sind die Anzahl der Personen in der jeweiligen Antwortkategorie)

Item	gering	1	2	3	4	5	6	hoch
		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Bei der Sidesticksteuerung wird zusätzlicher Ausbildungsbedarf nötig.	1	3		1				
Wie hoch war Ihre Arbeitsbelastung?			2	2			1	

4.7 Diskussion

Während die meisten Piloten bei einer mittleren Arbeitsbelastung gut mit der Steuerkonfiguration zurechtkamen und den erforderlichen Ausbildungsbedarf als gering einschätzten, äußerte sich ein Pilot sehr ablehnend. Es ist zu vermuten, dass dies auf einen hohen Frustrationsgrad zurückzuführen ist. Dieser Pilot hat bereits früh in diesem Teilversuch eine „innere Aversion“ gegenüber der Simulation und „Übelkeit“ geäußert. Mit der Kenntnis, dass dieser sich – länger als die anderen Piloten – zu diesem Zeitpunkt bereits seit fast 2 Stunden im Simulator befand, ist darauf zu schließen, dass dieses Urteil von Ermüdung geprägt ist. Er selbst gab auch die Arbeitsbelastung als hoch an (siehe Tabelle 2).

Der von allen Piloten am meisten geäußerte Kritikpunkt war die mangelnde Referenz zur Stellung des Sidesticks. Dies ist gerade beim Hubschrauber besonders kritisch, da es hier eine starke Kopplung der Hub- und Giersteuerung gibt. Deshalb erfordert eine Kollektiveingabe (linker Stick) gerade im Langsamflug immer auch eine Pedaleingabe zur Stabilisierung der Gierbewegung. In einem stehenden Simulator wirkt sich diese Tatsache besonders kritisch aus, da der Bewegungseindruck nur über die Sicht, nicht aber über den Gleichgewichtssinn

vermittelt wird und damit sehr verzögert vom Piloten wahrgenommen wird. Die Piloten sind im Simulator daher mehr als im echten Hubschrauber auf eine angewöhnte Steuerstrategie angewiesen, bei der sie bei einer Kollektivbewegung automatisch eine Pedalbewegung mit einsteuern. Diese Strategie ergibt dann Schwierigkeiten, wenn das angewöhnte Verhältnis der Steuereingaben nicht mehr stimmt, weil sich Sidestick und Kollektivhebel sowohl in Gesamtweg als auch in der Art der Bedienung („aus den Fingern“) unterscheiden. Die Piloten sprachen in diesem Zusammenhang von „elektronischen Armen und mechanischen Füßen“. Das bedeutet, dass ein kleiner Steuerausschlag am Sidestick mit einer sehr großen Steuerbewegung auf den Pedalen kombiniert werden musste. Der Sidestick ist den Piloten also gegenüber den Pedalen zu empfindlich: Der eher ablehnend eingestellte Pilot äußerte dazu konstruktiv: *„Empfindlichkeit runternehmen ... Dies ist der Hauptschlüssel zur Akzeptanz“*. (Anmerkung der Autoren: 100 % Steuerweg wurden linear auf 100 % Weg am Aktuator abgebildet. Die hohe Empfindlichkeit rührt aus dem kurzen Hebelarm.)

Aus den Pilotenantworten wird geschlossen, dass sich ein Sidestick prinzipiell als Kollektivsteuer eignet. Es wird ein technisch komplexerer Sidestick benötigt, mit welchem sich weitere aktive Elemente, wie z.B. Reibungsbremse und Trimmung, realisieren lassen. Ferner müssen die Steuerkräfte angepasst werden, und es bedarf letztlich einer Referenz über die Sidestickstellung. Dabei kann es schon ausreichend sein, dass sich der Pilot Hilfen im Cockpit sucht und z.B. die Position relativ zur Armauflage bestimmt. Ergänzend können auch neue Referenzen konstruiert werden. Eine Kompensation der Nachteile einer mangelnden Stellungsreferenz wird darüber hinaus auch durch die Einführung von aktiven Funktionen zur haptischen Unterstützung erreicht (Whalley et al., 2000). Hier haben die Versuchspiloten für die gegebene Flugaufgabe mit aktiver Unterstützung durch den Sidestick eine deutliche Verbesserung gegenüber dem Sidestick ohne Unterstützung attestiert.

5 Entwicklung einer integrierten Längs- und Querführungsassistenz am Institut FS

Während die oben vorgestellte Studie des Instituts FT die Cockpitkonfiguration für den Einsatz eines aktiven Sidesticks überprüft, soll hier eine Studie des Instituts FS vorgestellt werden, welche sich mit der Gestaltung und Evaluation von aktiven Funktionen bei der Fahrzeugführung beschäftigt. Das Institut FS forscht an der Entwicklung von Assistenzsystemen, die sich aktiver Stellteile wie z.B. aktiven Sticks, aktiven Lenkrädern oder Pedalen bedienen. Charakteristisches Merkmal dieser Stellteile ist, dass Informationen überwiegend über haptische Signale an den Fahrer übermittelt werden. Die Vorteile der Nutzung des haptischen Kanals wurden bereits in Kapitel 3 dargelegt. Hier soll nun zunächst auf die Gestaltung und Untersuchung einer Assistenz für die kombinierte Längs- und Querführung der Fahrzeugsteuerung eingegangen werden, die im Rahmen des DFG-Projekts „H-Mode I“ am Institut FS durchgeführt wurde (für eine detaillierte

Darstellung: Kelsch et al., 2006). Anschließend soll aufgezeigt werden, wie die entwickelte Assistenz über die verschiedenen Realitätsgrade der Simulationen hindurchgeführt wird, um sich dem Ziel eines Assistenzsystems für ein reales Fahrzeug im Straßenverkehr anzunähern.

5.1 Entwicklung und Implementierung des Prototyps

Ausgangspunkt für die Entwicklung einer Assistenz zur kombinierten Längs- und Querverführung war zum einen die biologisch inspirierte „H“-Metapher für hochautomatisierte Fahrzeuge (Flemisch, 2004), wobei „H“ sowohl für haptisch als auch für „Horse“ steht. Grundlage war weiterhin das erwartungsbasierte Vorgehen im so genannten Theatersystem des Instituts, welches im SMPLSim implementiert ist (für eine detaillierte Beschreibung des Designprozesses siehe Schomerus et al., 2006; Schindler & Flemisch, 2007). Das Ziel der Assistenz lag darin, den Fahrer sowohl bei der Lenkung (Querverführung) als auch bei der Geschwindigkeitshaltung (Längsverführung) zu unterstützen. Weiterhin sollte die Interaktion zwischen Mensch und Automation in Situationen gestaltet werden, in denen ein Konflikt zwischen den Einschätzungen des Fahrers und der Automation auftreten kann.

Für die Entwicklung der Assistenz wurden als Ausgangspunkt verschiedene Streckenszenarien definiert, anhand derer die Interaktionsstrategie entwickelt wurde. Die Szenarien umfassten Aspekte der Geschwindigkeitsbegrenzung, der Spurhaltung sowie des Spurverlassens im Regelfall und in Konfliktsituationen. Hierzu wurde ein virtueller Straßenzug entworfen, welcher verschiedene Einzel-elemente zu einem Rundkurs vereint. Der Rundkurs bestand aus klothoidischen Kurven unterschiedlicher Radien und Bogenlängen, aus Elementen mit der Aufforderung, die Spur zu verlassen, sowie aus Weggabelungen, bei welchen ein unterschiedlich starker Konflikt mit der Automation hinsichtlich der gewünschten Richtung vorlag.

Für das oben beschriebene Versuchsszenario wurde zunächst das Theatersystem eingesetzt, um eine Assistenz zu entwickeln, die den Fahrer sowohl in der Quer- als auch in der Längsverführung seines Fahrzeugs unterstützt. Die Assistenz wurde dabei für die aktiven Sidesticks ausgelegt und ist gekennzeichnet durch eine kontinuierliche Spurführung, die durch Funktionen zur Geschwindigkeitshaltung und Geschwindigkeitsanpassung vervollständigt wird. In Abhängigkeit von Situation und Konflikt werden weitere diskrete und kontinuierliche haptische Signale auf den Sidestick eingespielt, die sich beim Spurverlassen von einer Information über eine Warnung bis hin zum Eingriff steigern können.

Um das bisher im Theatersystem durch Mitglieder des Designteams ausschließlich menschlich emulierte Interaktionsdesign der Assistenz einem höheren Realitätsgrad zuzuführen, wurde dieses schrittweise in die Software des Prototyps abgebildet. Für die Programmierung des Prototyps wurde ein hybrider Ansatz gewählt, wobei eine diskret schaltende *State-Machine* mit den kontinuierlich

arbeitenden Reglern für die Spurführung, zusätzlichen Kraftschwellen und Vibrationsmustern des aktiven Sidesticks kombiniert wurde.

5.1.1 Überprüfung des Prototyps

Um herauszufinden, welche Qualität und Akzeptanz das entwickelte Interaktionsdesign und der implementierte Prototyp haben, wurde ein *Usability Assessment* mit sechs Personen durchgeführt. Alle Teilnehmer durchfuhren das oben beschriebene Versuchsszenario sowohl mit als auch ohne Unterstützung durch den Prototyp, so dass Vergleichsdaten in Form einer Baseline-Messung vorliegen. Um die Teilnehmer an das Fahren mit dem Sidestick und an das Versuchsszenario zu gewöhnen, wurde vor der Aufnahme von Versuchsdaten zunächst eine Übungsphase angesetzt. Daran anschließend folgten die Fahrten sowohl ohne als auch mit Unterstützung durch den Prototyp.

Während dieser Fahrten wurden vielfältige Daten der Simulation (z.B. Fahrzeuggeschwindigkeit), der Interaktion mit dem Stick (z.B. Kräfte am Stick) sowie Daten zur Akzeptanz in Form einer Befragung erhoben. Die Daten wurden in quantitativer und qualitativer Hinsicht analysiert. Die Befragung zur Akzeptanz des Prototyps zeigte bei den sechs Teilnehmern positive Ergebnisse.

Anhand der aufgezeichneten Fahrdaten konnte nachgewiesen werden, dass der entwickelte Prototyp die Spurhaltung wie erwartet deutlich verbessert: Im Vergleich zu Fahrten ohne Unterstützung (Baseline) wiesen die Teilnehmer in Fahrten mit Unterstützung durch den Prototyp eine wesentlich geringere mittlere Querabweichung auf. Die mittlere Geschwindigkeit der Durchfahrten unterschied sich dagegen nicht. Bei Betrachtung der Daten in Hinblick auf charakteristische Einzeleffekte wurde u.a. festgestellt, dass die Gegenkraft des Prototyps in einigen Konfliktsituationen zu stark eingestellt war. Dies wurde auch durch die Ergebnisse der Befragung gestützt, in welcher einige Teilnehmer eine zu starke Kraft des Prototyps als unangenehm empfanden.

Die Personen beurteilten die Interaktion mit dem Prototyp als intuitiv, konsistent und leicht erlernbar (Tabelle 3).

Tab. 3: Auszug der Ergebnisse aus dem Usability Assessment (angeben sind die Anzahl der Personen in der jeweiligen Antwortkategorie sowie die Mittelwerte (M) und Standardabweichungen (SD))

Item	Nein, gar nicht	1 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>	5 <input type="checkbox"/>	6 <input type="checkbox"/>	7 <input type="checkbox"/>	Ja, sehr	M (SD)
Die Interaktion mit dem Prototyp war intuitiv.					1	1	4			6,50 (0,84)
Die Interaktion mit dem Prototyp war konsistent.				1	1	1	3			6 (1,26)
Die Interaktion mit dem Prototyp war leicht zu erlernen.						2	4			6,67 (0,52)

Auch die qualitative Auswertung von offenen Fragen des Interviews zeigte überwiegend positive Ergebnisse. So wurden einzelne Aspekte wie die Geschwindigkeitshaltung oder die Führung in Kurven als auch das Gesamtdesign des Prototyps als gut gelungen hervorgehoben.

Zusammenfassend zeigte sich, dass der Prototyp seine primäre Aufgabe der Spurführung und Spurhaltung erfüllt und sein Einsatz, nicht überraschend, zu einer verringerten Querabweichung führt. Weiterhin erfuhr der entwickelte Prototyp im *Usability Assessment* eine gute Akzeptanzbewertung.

5.1.2 Momentane und zukünftige Arbeiten am Prototyp

Die vorgestellte Assistenz zur kombinierten Quer- und Längsführung wird momentan und in zukünftigen Arbeiten weiterentwickelt und für eine Überprüfung mit realitätsnäheren Werkzeugen (Dynamischer Fahrsimulator und FASCar) vorbereitet. Ziel ist es, das Assistenzsystem zum einen auf andere aktive Interaktionsmedien, wie ein aktives Lenkrad und aktives Gaspedal, zu übertragen. Zum anderen soll die Implementierung der Assistenz in realitätsnähere Forschungsumgebungen dazu dienen, die Assistenz anhand kritischer Experimente zu überprüfen. Experimentelle Studien im Dynamischen Fahrsimulator bieten dabei die Möglichkeit, die Assistenz unter realitätsnahen Verkehrsbedingungen, z.B. mit umgebendem Verkehr, und in komplexeren Fahrsituationen zu testen. Die simulierte Umgebung ermöglicht dabei eine systematische Variation der Untersuchungsbedingungen, so dass unter methodischen Gesichtspunkten eine hohe experimentelle Kontrolle sichergestellt ist. Im Versuchsfahrzeug FASCar kann die Assistenz zusätzlich auf die Einwirkung von realen Fahrzeugeinflüssen hin untersucht werden. Dabei ist zu beachten, dass die recht starken, aktiven Eingriffe der Assistenz nur auf einem Testgelände durchgeführt werden dürfen, so dass die Fahrsituationen und Verkehrsbedingungen nur bedingt realitätsnah dargestellt werden können. Die Nutzung eines Testgeländes bietet jedoch den Vorteil, dass, ähnlich wie im Simulator, verschiedene Versuchsbedingungen variiert werden können und somit experimentell kontrollierbar sind.

Zur Vorbereitung kritischer Experimente wurde der im SMPLab erprobte Prototyp zur integrierten Quer- und Längsführung in das Versuchsfahrzeug FASCar und in den institutseigenen Dynamischen Fahrsimulator eingerüstet. Dazu wurde zunächst je ein aktiver Sidestick in den Fahrsimulator und das FASCar eingebaut (Bild 6). Aufgrund der unterschiedlichen Dynamik der Fahrzeugmodelle im SMPLSim und dem Fahrsimulator bzw. des FASCars selbst, muss die grundlegende Sticksteuerung dabei dem jeweiligen Werkzeug angepasst werden.

Da der SMPLSim eher auf integrierte Designarbeit denn auf Simulationsgüte hin optimiert ist, ergaben sich weiterhin durch die realitätsnähere Simulation im Bewegungssimulator und durch das Versuchsfahrzeug erhöhte Anforderungen an die Automation und die Situationserfassung. Um die Durchgängigkeit der Werkkette zu gewährleisten, wurde der Prototyp softwareseitig in ein Inter-

aktionsmodul und ein Automationsmodul aufgeteilt. Diese beiden Module werden abhängig von dem genutzten Werkzeug jeweils in ein spezifisches Situationserfassungsmodul sowie ein Schnittstellenmodul zur Fahrzeugsteuerung eingebunden.



Bild 6: Integrierter aktiver Sidestick in FASCar

Erste Fahrversuche in beiden Versuchsumgebungen zeigen, dass die im SMPLSim entwickelte Assistenz sowohl im Dynamischen Fahrsimulator als auch im Versuchsträger FASCar eingesetzt werden kann und fahrbar ist. Experimentelle Studien in beiden Versuchsumgebungen müssen nun nachweisen, ob sich der entwickelte Prototyp zur integrierten Längs- und Querverführung auch in kritischen Situationen und realitätsnäheren Fahrsituationen bewährt. Zusammenfassend lässt sich das dargestellte Vorgehen wie folgt beschreiben: Ausgehend von der Entwicklung der Assistenz im SMPLSim, der Implementierung des Prototyps in Software sowie einer ersten Überprüfung der Assistenz im *Usability Assessment* wird der Prototyp technisch für den Einsatz im Dynamischen Fahrsimulator und im FASCar vorbereitet. Entscheidend ist, dass sowohl die Software als auch Erkenntnisse aus den Experimentalstudien in die jeweils anderen Versuchsumgebungen zurückgeführt werden können, um das Assistenzdesign dort weiterzuentwickeln oder in anderen Umgebungsbedingungen erneut zu überprüfen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die aufgeführten Beispiele zeigen, dass bei der Integration aktiver Steuerorgane viele Gemeinsamkeiten zwischen den durch die Institute FT und FS repräsentierten Domänen vorhanden sind. Deutlich wird zum einen, dass beide Institute ähnlich abgestufte Simulationsketten einsetzen. Diese reichen von mathematischen Simulationen über realitätsnähere Simulatoren, wie dem Dynamischen Fahrsimulator oder dem Bodensimulator, bis hin zu den Versuchsträgern FHS und

FASCar, die in realer Umwelt eingesetzt werden. Auch die auftretenden MMI-spezifischen Fragestellungen sind einander sehr ähnlich. Beide Institute arbeiten an der Entwicklung und Bewertung von Assistenzsystem, die über aktive Steuerorgane haptische Informationen an den Piloten oder Fahrer übermitteln. Um neu entwickelte Prototypen innerhalb der gesamten Werkzeugkette zu testen, ist zum einen die Kommunikation zwischen Entwicklern und Simulationsverantwortlichen entscheidend. Zum anderen ist der Erfahrungsaustausch zwischen den Instituten FT und FS interessant, da trotz unterschiedlicher Domänen deutliche Überschneidungsbereiche existieren, die z.B. in ein gemeinsames haptisches Vokabular für die Bedienung von hochautomatisierten Luft- und Bodenfahrzeugen münden können.

Literatur

- Augustin, M.J.; Dreier, M.; Yeary, R.D.; Erdos, R.; Gubbels, A.; Damin, M. & Whalley, M. (2002). Development and Flight Demonstration of a HUMS-Based Helicopter Limit Cueing (HLC) System. In *Proceedings of the AHS 58th Annual Forum*. 11.05.-13.05.2002. Montreal.
- Benoit, B.; Kampa, K.; Dequin, A.-M.; Grünhagen, W.; Basset, P.-M. & Gimonet, B. (2000). HOST, a General Helicopter Simulation Tool for Germany and France. In *Proceedings of the AHS 56th Annual Forum*. Virginia Beach.
- Bernotat, R. (1978). Ergonomische Gestaltung von Mensch-Maschine-Systemen. In J. Rutenfranz (Hrsg.), *Arbeitsphysiologische Grundprobleme von Nacht- und Schichtarbeit*. Opladen: Westdeutscher Verlag
- Flemisch, F.O. (2004). Erhöhung der Verlässlichkeit von Mensch-Fahrzeug-Systemen: Die H-Metapher als Richtschnur für Fahrzeugautomation und -interaktion. In M. Grandt (Hrsg.), *Verlässlichkeit der Mensch-Maschine-Interaktion* (DGLR-Bericht 2004-03, S. 49-71). Bonn: Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt e.V..
- Griffiths, P. & Gillespie, R.B. (2005). Sharing Control Between Human and Automation Using Haptic Interface: Primary and Secondary Task Performance Benefits. *Human Factors*, 47(3), 574-590
- Kaletka, J.; Kurscheid H. & Butter, U. (2003). FHS - the New Research Helicopter Ready for Service. In *Proceedings of the 29th European Rotor Forum*. 16.09.-18.09.2003 (S. 35/1 - 35/12). Friedrichshafen.
- Kelsch, J.; Flemisch, F.; Löper, C.; Schieben, A. & Schindler, J. (2006). Links oder rechts, schneller oder langsamer? Grundlegende Fragestellungen beim Cognitive Systems Engineering von hochautomatisierter Fahrzeugführung. In M. Grandt (Hrsg.), *Cognitive Systems Engineering in der Fahrzeug- und Prozessführung* (DGLR-Bericht 2006-2, S. 227-240). Bonn: Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt e.V.
- Krauter, R. (2007). *Kleine Klappe, große Wirkung: Ingenieure entwickeln Hubschrauber mit neuem Dreh*. (Wissenschaft im Brennpunkt). Deutschlandfunk (Köln): 12.08.2007, Internetlink: <http://www.dradio.de/dlf/sendungen/wib/653914/>
- Milgram, P.; Takemura, H.; Utsumi, A. & Kishino, F.: Augmented Reality (1994): A class of displays on the reality-virtuality continuum. In *Proceedings of Telemanipulator and Telepresence Technologies : Vol. 2351*.

- Müllhäuser, M. & Grünhagen, W. v. (2007). *Studie zur Pilotenakzeptanz eines Konzepts zur Hubschrauber-Kollektivsteuerung mit einem Sidestick*, (unveröffentlichter Bericht). Braunschweig: DLR - Institut für Flugsystemtechnik
- Rohmert, W. (1993). Grundlagen der technischen Arbeitsgestaltung. In H. Schmidtke (Hrsg.), *Ergonomie* (S. 493-502). München: Hanser Verlag.
- Schindler, J. & Flemisch, F. O. (2007). Prospektive Gestaltung von Fahrzeugautomation: Agile Prototypentwicklung und Integriertes Testen im DLR-SMPLab. In Tagungsband: *Prospektive Gestaltung von Mensch-Technik-Interaktion*. Düsseldorf: VDI Verlag.
- Schomerus, J.; Flemisch, F.O.; Kelsch, J.; Schieben, A. & Schmuntzsch, U. (2006): Erwartungsbasierte Gestaltung mit der Theatersystem- / Wizard-Of-Oz-Technik am Beispiel eines haptischen Assistenzsystems. In *Tagungsband AAET 2006 Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel*, Braunschweig: Gesamtzentrum für Verkehr Braunschweig, S. 209 – 225.
- Stöbe, M. (2006): Die Fahrsimulation des DLR - Funktionen und Anwendungsmöglichkeiten. Vortrag auf *ZVB-Kolloquium 2006*, Braunschweig, 19.11.2006
- Whalley, M.S.; Hindson, W.S. & Thiers, G.G. (2000). A Comparison of Active Sidestick and Conventional Inceptors for Helicopter Flight Envelope Tactile Cueing. In *Proceedings of the AHS 56th Annual Forum*. Virginia Beach

Autoren

Dipl.-Ing. M. Müllhäuser
Dr. W. von Grünhagen

DLR-Institut für Flugsystemtechnik (FT)
Braunschweig
E-Mail: mario.muellhaeuser@dlr.de

Dipl.-Psych. A. Schieben
Dr. F. Flemisch

DLR-Institut für Verkehrsführung und
Fahrzeugsteuerung (FS)
Braunschweig
E-Mail: anna.schieben@dlr.de